

Разработка методов генетического синтеза сбоеустойчивых комбинационных схем

Д.В. Тельпухов

Институт проблем проектирования в микроэлектронике (ИППМ РАН), г. Москва,
nofrost@inbox.ru

Аннотация — Устойчивости к сбоям и отказам радиоэлектронной аппаратуры в настоящее время уделяется особое внимание. Этому способствует расширение области применения интегральных схем, сопряженное с повышением допустимых пределов дестабилизирующих воздействий. Кроме того, уменьшение технологических норм, также приводит к повышению уязвимости интегральных схем к воздействию специальных факторов. В настоящее время уже на этапе разработки зачастую необходимо учитывать требования к сбоеустойчивости и применять различные методы и средства для разработки наиболее устойчивых схем. Вследствие этого в настоящее время существует большой запрос на средства автоматизации проектирования сбое- и отказоустойчивых интегральных схем.

В статье предложен метод синтеза комбинационных схем, основанный на базовых принципах эволюционных алгоритмов. Данный метод позволяет синтезировать небольшие логические схемы, устойчивые к случайным сбоям, возникающим вследствие попадания тяжелых заряженных частиц.

Ключевые слова — эволюционный синтез, сбоеустойчивость, комбинационные схемы, генетические алгоритмы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача создания сбоеустойчивых комбинационных схем на логическом уровне в формулировке построения надежных схем из ненадежных компонентов была впервые поставлена в фундаментальной работе Фон Неймана [1] и получила дальнейшее развитие в трудах W.H. Pierce, J.G. Tryon, N. Pippenger [2-5]. В рамках этой постановки задачи было разработано большое количество различных мажоритарных подходов, защищающих схемы на архитектурном уровне, таких как каскадное тройное резервирование [2], логические схемы с четырехкратным резервированием [3,4], случайно-переплетенная логика [5] и т.д. Однако, несмотря на большое количество научных публикаций, на практике для защиты комбинационных схем до сих пор используют архаичные методы тройного резервирования. Это объясняется отсутствием четких критериев оценки эффективности вкупе с недостаточным исследованием методов на большом

диапазоне тестовых схем, с использованием реальных технологических библиотек.

В рамках предлагаемого подхода предлагается обобщить задачу повышения сбоеустойчивости конкретной логической схемы до задачи синтеза сбоеустойчивой комбинационной схемы. Задача логического синтеза схем, оптимизированных по заданным параметрам, является, по сути, задачей поиска оптимального или близкого к оптимальному решения из всего пространства возможных решений.

Пусть нам дана логическая функция, заданная выражением, либо таблицей истинности. Очевидным является тот факт, что существует бесконечное множество логических схем, реализующих заданную функцию. Задача состоит в отыскании удовлетворительной по заданным критериям схемы из всего пространства возможных решений.

Традиционные методы повышения отказоустойчивости трансформируют исходную схему без изменения выполняемой логической функции, реализуя одно конкретное решение для каждой схемы. Полный перебор всех возможных решений невозможен, поэтому в задачах логического синтеза зачастую используют разного рода эвристики (Espresso, MIS II, ...).

В статье предлагается использовать генетические методы [6], [7] для поиска схем, близких к оптимальным, по критериям, включающим критерии отказоустойчивости и архитектурной избыточности.

II. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Определим основные структуры данных для представления комбинационных схем в виде фенотипа и генотипа. Определим также базовые процедуры над этими структурами. Фенотип представляет собой непосредственно нетлист комбинационной схемы. Основная функция фенотипа заключается в получении выходного вектора при подаче входных воздействий. Генотип служит базой для генетических процедур: кроссинговера, мутации и т.д.

A. Фенотип

Схема представляется в виде списка меток входов, списка меток выходов и словаря элементов. Под

словарем, по аналогии с языком Python, понимается ассоциативный массив с доступом по ключу. В нашем случае ключом является метка логического элемента, в то время как элемент массива – это структура, объединяющая тип элемента и метки элементов, подключенных к входам. На примере тестовой схемы ISCAS c17, представленной на рис. 1, рассмотрим описание фенотипа схемы.

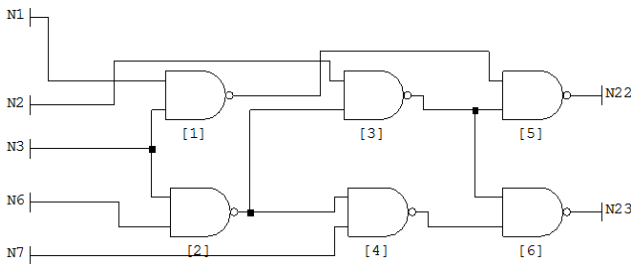


Рис. 1. Структурная схема ISCAS'85 C17

Схема будет представлена в виде следующей структуры:

```
Inputs: ['N1', 'N2', 'N3', 'N6', 'N7']
Outputs: ['N22', 'N23']
Elements: {
    'N10': ('NAND', ['N1', 'N3']),
    'N11': ('NAND', ['N3', 'N6']),
    'N16': ('NAND', ['N2', 'N11']),
    'N19': ('NAND', ['N11', 'N7']),
    'N22': ('NAND', ['N10', 'N16']),
    'N23': ('NAND', ['N16', 'N19'])
}
```

Базовым методом класса фенотипа схемы, на основе которого строятся остальные процедуры, связанные с оценкой сбоеустойчивости и т. д., является функция симуляции. Она принимает на вход бинарный вектор входных воздействий, а также бинарный вектор ошибок, длина которого равна числу элементов: единица обозначает наличие ошибки в соответствующем элементе, ноль – её отсутствие. Выходом функции является бинарный вектор реакции схемы на полученное воздействие.

В. Генотип

Для представления схемы в виде хромосомы необходимо реализовать некоторое одномерное представление, однозначно описывающее структуру схемы. Для этой цели было разработано упорядоченное линейное представление комбинационной схемы. Базовым элементом в этом представлении также, как и в фенотипе является структура, объединяющая тип элемента и ссылки на элементы, подключенные ко входам. Однако вместо меток используется позиция элемента в массиве элементов. Логические элементы в хромосоме отсортированы в топологическом порядке. Дополнительно приводятся позиции элементов, подключенные к выходам схемы, а также число

характеризующее число входов. Представление схемы ISCAS c17 в виде хромосомы выглядит следующим образом:

```
(5, [ ('NAND', 0, 2),
      ('NAND', 2, 3),
      ('NAND', 1, 6),
      ('NAND', 6, 4),
      ('NAND', 5, 7),
      ('NAND', 7, 8)
    ], [9, 10])
```

Данное представление, в отличие от фенотипа, затрудняет простейшие манипуляции со схемами, такие как склейка схем, замена участков схем и т.д., поскольку требует постоянной перенумеровки и пересортировки, однако, облегчает манипуляции, связанные с генетическими операторами.

Предлагаемое представление хромосом обладает рядом преимуществ. Во-первых, оно позволяет кодировать комбинационные схемы с произвольным числом элементов, что является нетипичным для методов эволюционного синтеза [8]. Во-вторых, такое представление позволяет легко реализовывать основные генетические операторы, такие как мутация и кроссинговер, даже с учетом разной длины скрещиваемых хромосом. Следует отметить, что кроссинговер в данном контексте позволяет обмениваться не только участками схемы, но также обеспечивает неявный обмен межсоединениями.

III. ОСНОВНЫЕ ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОПЕРАТОРЫ

Далее рассмотрим основные генетические операторы, необходимые для эффективной реализации алгоритма.

Создание исходной популяции. Для создания исходной популяции был реализован генератор произвольных схем. Произвольные схемы совпадают с искомой эталонной функцией по количеству входных/выходных портов, и имеют произвольную структуру. От качества исходной популяции зависит скорость сходимости и эффективность всего алгоритма. В некоторых случаях в исходную популяцию можно эффективно внедрять участки схем, синтезированных из эталонной функции традиционными методами. Однако зачастую это приводит к быстрому воспроизведению алгоритмом именно этих синтезированных схем.

Фитнесс функция. Фитнесс функция предлагаемого генетического алгоритма задается следующей формулой:

$$f = \varepsilon + [\varepsilon] \cdot \alpha \quad (1)$$

где f – фитнес функция, ε – степень близости функции, реализуемой особью, с эталонной функцией, α – коэффициент логической чувствительности к случайным сбоям [9][10].

Данная метрика базируется на вероятностной модели ошибок Фон-Неймана [1], в рамках которой каждый вентиль может инвертировать свое выходное значение независимо от других вентилях с некоторой фиксированной вероятностью. Определив бинарный вектор \bar{X} как вектор входных воздействий, а вектор \bar{e} , имеющий логическую единицу в позиции сбойных вентилях, как вектор ошибок, коэффициент логической чувствительности к случайным сбоям определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}, \bar{e} | |\bar{e}|=1} E(\bar{X}, \bar{e}), \quad (2)$$

где N это число входов, а $E(\bar{X}, \bar{e})$ обозначает характеристическую функцию набора пар векторов:

$$E(\bar{X}, \bar{e}) = \begin{cases} 1, & \text{если набор } (\bar{X}, \bar{e}) \text{ приводит к ошибке} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Коэффициент логической чувствительности схемы представляет собой сумму наблюдаемостей вентилях $\alpha = \sum_{i \in \Omega} o_i$ и характеризует среднее число ненадежных элементов в схеме, т.е. тех элементов, ошибка в которых приводит к ошибке на выходе схемы. Наблюдаемость вентиля следует рассматривать как вероятность того, что ошибка на вентиле не будет маскирована и повлияет на выход логической схемы при условии, что на остальных вентилях ошибки не возникло. Наблюдаемость вычисляется по формуле:

$$o_i = \frac{1}{2^N} \sum_{\bar{X}} E(\bar{X}, \bar{e}_k),$$

где \bar{e}_k имеет только одну единицу на позиции e_i , в то время как остальные $e_{j \neq i} = 0$.

Вычислительная сложность данной метрики линейна относительно количества элементов, что вкупе с методами бит-параллельного моделирования и методами Монте-Карло позволяет использовать эту метрику для сравнительно больших схем. Предлагаемый коэффициент не зависит от вероятности сбоя вентиля, что позволяет использовать его на ранних этапах проектирования сбоеустойчивых схем. Также данная метрика эффективна для сравнения методов повышения сбоеустойчивости, когда не определена элементная база и условия эксплуатации схемы. Для большинства практических применений в условиях, когда вероятность сбоя вентиля стремится к нулю – эта аппроксимация является наиболее точной, являясь касательной к графику полинома ошибки в точке ноль.

Степень близости ϵ варьируется от 0 до 1 и может вычисляться различными способами. Самым простым является метод симуляции и подсчета доли совпадений с эталоном. Эффективнее считать долю совпадений отдельно по каждому выходу схемы. Это дает больше информации для генетического алгоритма и ускоряет процесс сходимости эволюционного поиска.

Как можно видеть из формулы (1), характеристики сбоеустойчивости схемы начинают влиять на значение

фитнесс функции только когда ϵ становится равным единице, иными словами схема становится эквивалентной эталонной функции. Это обеспечивает плавный эволюционный поиск вначале схем, реализующих заданную функцию, а затем и схем, обладающих наилучшими характеристиками устойчивости к сбоям.

Кроссинговер. Под кроссинговером подразумевается скрещивание двух родительских хромосом и получение двух потомков. Это происходит путем выбора точки разреза на родительских хромосомах с последующим обменом участками. Вследствие такой операции удастся обменяться не только типами элементов, но и некоторыми их взаимосвязями. Следует отметить, что такая реализация операции скрещивания может проводиться над хромосомами разной длины. Также аналогичным образом можно реализовать и двухточечный кроссинговер.

Мутация. Мутация особей реализует искажение отдельных генов хромосомы, которое выражается в замене типов элементов или отдельных межсоединений. В работе предлагается использовать метод адаптивной мутации, который подразумевает варьируемую вероятность мутации гена в зависимости от текущей скорости сходимости эволюционного процесса. В случае долгой стагнации вероятность мутации для каждого гена постепенно увеличивается до тех пор, пока генетический алгоритм не покинет локальный оптимум.

Селекция. Под селекцией понимается процесс отбора особей в новую популяцию. В рамках селекции можно использовать метод ассиметричного колеса рулетки, метод состязания или метод простого ранжирования, когда в новую популяцию выбираются n самых приспособленных особей. Для ряда случаев эффективно использовать так называемый «элитизм», когда в новую популяцию гарантировано переходит самая приспособленная особь. Этот прием позволяет сделать процесс эволюционного поиска более предсказуемым, однако может привести к преждевременной сходимости к локальному оптимуму.

IV. БАЗОВАЯ СТРУКТУРА АЛГОРИТМА

На рис. 2 представлен базовый маршрут генетического алгоритма синтеза сбоеустойчивых комбинационных схем.

На первом этапе генерируется исходная популяция. После этого производится оценка фитнесс функции для каждой особи. Следующим этапом является выбор родителей для скрещивания. Этот выбор происходит либо с помощью метода ассиметричного колеса рулетки, либо метода состязаний. После этого реализуются кроссинговер и мутация некоторой доли потомков. После этого исходная популяция и популяция потомков объединяются и реализуется этап отбора в новую популяцию. После этого начинается новый цикл генетического алгоритма.

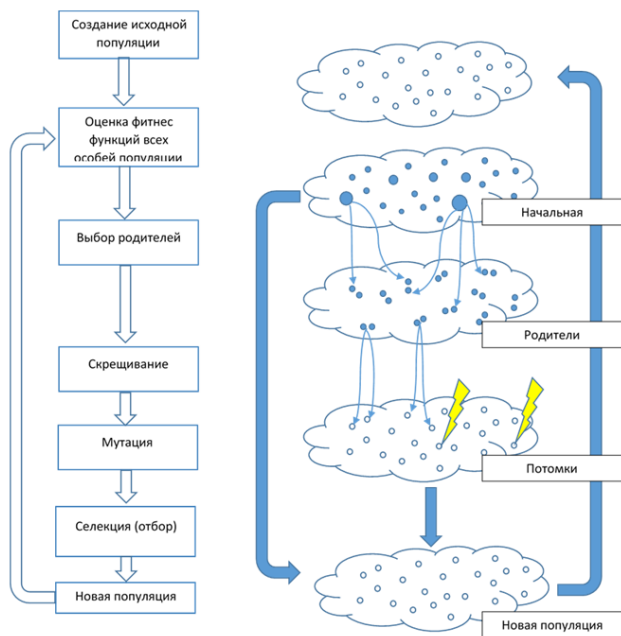


Рис. 2. Базовая структура генетического алгоритма

Для ускорения процесса сходимости и уменьшения проблем, связанных с преждевременной сходимостью к локальным экстремумам, был предложен ряд методов, связанных с использованием динамической фитнес-функции, а также методов адаптивной мутации. Также, помимо степени близости к эталону и параметрам логической чувствительности к сбоям, в фитнес функцию генетического алгоритма было предложено включить параметр энтропии комбинационных схем. Это позволяет отсекавать тривиальные случаи, когда структурно очень простое решение сразу оказывается достаточно близким к эталону, но никакими постепенными изменениями не может стать к нему еще ближе. Обозначенные решения в совокупности привели к созданию программного комплекса, в рамках которого удалось реализовать синтез небольших комбинационных схем с улучшенными параметрами сбоеустойчивости.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе отладки параметров генетического алгоритма было проведено большое число вычислительных экспериментов, в рамках которых удалось получить ряд комбинационных схем с улучшенными характеристиками сбоеустойчивости. На рис. 3 представлен пример эволюционного синтеза схемы полного сумматора. Синим представлено среднее по популяции значение фитнес функции, красным – максимальное значение, желтым – среднее значение энтропии. Синтез схемы прошел за менее чем 300 поколений.

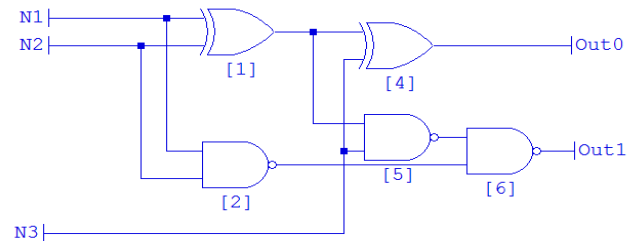


Рис 3. Генетический синтез полного сумматора

VI. ВЫВОДЫ

В статье представлен метод синтеза сбоеустойчивых комбинационных схем, в основе которого лежит генетический алгоритм. Описана базовая структура алгоритма, а также некоторые детали, касающиеся представления данных и основных генетических операторов. В фитнес функцию алгоритма внедрена метрика сбоеустойчивости комбинационной схемы, характеризующая среднее число ненадежных элементов, то есть элементов, ошибка в которых влияет на выходы схемы.

Метод показывает хорошую сходимость для небольших схем, причем отбор сначала ведется по параметру близости функции к эталонной, после чего начинает учитываться метрика сбоеустойчивости.

В качестве недостатков метода можно выделить недостаточную стабильность результатов работы алгоритма. На текущий момент существует вероятность ненахождения подходящей комбинационной схемы или слишком долгой работы алгоритма из-за попадания в локальный оптимум. Этот факт накладывает некоторые дополнительные ограничения на область применения данного метода.

Дальнейшая работа будет сосредоточена на улучшении предсказуемости алгоритма, увеличении скорости сходимости и расширении области применимости алгоритма на логические схемы средних размеров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. von Neumann, "Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components", Automata Studies, C.E. Shannon and J. McCarthy, eds., Princeton Univ. Press, 1956, pp. 43-98.
- [2] W.H. Pierce, Failure-Tolerant Computer Design, Academic Press, 1965.
- [3] J.G. Tryon, "Quadded Logic", Redundancy Techniques for Computing Systems, R.H. Wilcox and W.C. Mann, eds., Spartan Books, 1962, pp. 205-228. 4.
- [4] P.A. Jensen, "Quadded NOR Logic," IEEE Trans. Reliability, vol. 12, no. 3, Sept. 1963, pp. 22-31.
- [5] N. Pippenger, "Developments in 'The Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components,'" Proc. Symposia in Mathematics, American Mathematical Society, 1990, pp. 311-324.
- [6] Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы, учебник / Москва, 2010. (2-е издание, исправленное и дополненное)
- [7] Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений Москва, 2012.
- [8] Coello, C.A., Christiansen, A.D., Aguirre, A.H.: Use of Evolutionary Techniques to Automate the Design of Combinational Circuits. International Journal of Smart Engineering System Design (2000).
- [9] Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М.В. Разработка практических метрик для оценки методов повышения сбоеустойчивости комбинационных схем В сборнике: Информационные технологии и математическое моделирование систем. 2015. Труды международной научно-технической конференции. 2015. С. 79-81.
- [10] Стемпковский А.Л., Тельпухов Д.В., Соловьев Р.А., Мячиков М.В. Повышение отказоустойчивости логических схем с использованием нестандартных мажоритарных элементов. Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 10. С. 749-756.

Development of Methods for Genetic Synthesis of Fault-Tolerant Logic Circuits

D.V. Telpukhov

Institute for Design Problems in Microelectronics of RAS, Moscow, nofrost@inbox.ru

Abstract — Fault tolerance of electronic equipment is important task, which requires a special attention. This is facilitated by the expansion of application of the integrated circuits, coupled with an increase in the permissible limits of destabilizing effects that increase the vulnerability of integrated circuits. Currently, at the development stage, it is often necessary to take into account the requirements for fault tolerance and apply various methods and tools for developing the most stable circuits.

The article presents a method for synthesizing fault-tolerant logic circuits based on a genetic algorithm. The basic structure of the algorithm, as well as some details concerning data representation and genetic operators are described. The fitness function of the algorithm accounts for the failure metric of the combinational circuit, which characterizes the average number of unreliable elements, i.e. the elements whose error affects the outputs of the circuit.

For representation in the form of a chromosome, an ordered linear representation of the combinational circuit was developed. The basic element in this representation is the structure that combines the element type and links to the elements connected to the inputs. However, instead of labels, the position of the element in the array of elements is used. Such representation provides simplification of a number of genetic operators, as well as crossing chromosomes with different lengths.

The method shows good convergence for small circuits. Selection is first carried out by the parameter of the proximity of the function to the reference one, after which the metric of fault tolerance begins to be taken into account. However, the applicability of the method is limited to schemes with small size.

Keywords — evolutionary synthesis, fault-tolerance, combinational circuits, genetic algorithms.

REFERENCES

- [1] J. von Neumann, "Probabilistic Logics and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components," Automata Studies, C.E. Shannon and J. McCarthy, eds., Princeton Univ. Press, 1956, pp. 43-98.
- [2] W.H. Pierce, Failure-Tolerant Computer Design, Academic Press, 1965.
- [3] J.G. Tryon, "Quadded Logic", Redundancy Techniques for Computing Systems, R.H. Wilcox and W.C. Mann, eds., Spartan Books, 1962, pp. 205-228. 4.
- [4] P.A. Jensen, "Quadded NOR Logic," IEEE Trans. Reliability, vol. 12, no. 3, Sept. 1963, pp. 22-31.
- [5] N. Pippenger, "Developments in 'The Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components,'" Proc. Symposia in Mathematics, American Mathematical Society, 1990, pp. 311-324.
- [6] Gladkov L.A., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. Geneticheskie algoritmy, uchebnik / Moskva, 2010. (2-e izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe)
- [7] Kurejchik V.V., Kurejchik V.M., Rodzin S.I. Teoriya jevoljucionnyh vychislenij Moskva, 2012.
- [8] Coello, C.A., Christiansen, A.D., Aguirre, A.H.: Use of Evolutionary Techniques to Automate the Design of Combinational Circuits. International Journal of Smart Engineering System Design (2000).
- [9] Telpukhov D.V., Solov'ev R.A., Mjachikov M.V. Razrabotka prakticheskikh metrik dlja ocenki metodov povyshenija sboeustojchivosti kombinacionnyh shem V sbornike: Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie sistem. 2015. Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. 2015. P. 79-81.
- [10] Stempkovskiy A.L., Telpukhov D.V., Solov'ev R.A., Mjachikov M.V. Povyshenie otkazoustojchivosti logicheskikh shem s ispol'zovaniem nestandardnyh mazhoritarnyh jelementov. Informacionnye tehnologii. 2015. Vol. 21. № 10. P. 749-756.